第 40 卷 第 1 期
2022 年 3 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 40, No. 1
Mar., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.01.09

两种时延修正方法在嫦娥四号探测器 ΔDOR 测量中的应用

肖 威[1,2]，杨 鹏[1,2]，张志斌[1,2]，王广利[1,2,3,4]

(1. 中国科学院 上海天文台 天文地球动力学研究中心，上海 200030； 2. 中国科学院大学，北京 100049； 3. 中国科学院行星科学重点实验室 上海天文台，上海 200030； 4. 上海市导航定位重点实验室，上海 200030)

摘要： ΔDOR 测量是一种应用于深空探测中的差分 VLBI 技术，通过对探测器和射电源的测量结果进行差分处理，从而减弱或消除传播介质、台站设备、时钟等引起的测量误差。目前我国 ΔDOR 测量的相关后处理中，有以首颗射电源作为参考源和邻近射电源作为参考源的两种不同时延修正方法。利用对嫦娥四号实时任务期间 VLBI 测量数据对这两种方法进行研究分析，得到两者的时延结果相差在 2 ns 以内，且存在随时间变化的趋势；通过对基线时延闭合差以及定轨残差进行分析发现，相较于首颗射电源修正的方法，邻近源修正存在一定优势。

关 键 词： VLBI；ΔDOR；嫦娥四号；时延修正

中图分类号： P228.6 **文献标识码：** A

1 引 言

嫦娥四号 (Chang’e 4, CE4) 是中国探月工程二期发射的月球探测器，也是人类第一个着陆在月球背面的探测器，实现了人类首次月背软着陆，并对月面进行巡视勘察。其于 2018 年 12 月 8 日发射升空，2018 年 12 月 12 日完成近月制动，被月球捕获，2019 年 1 月 3 日成功在月背着陆。嫦娥四号任务是中国探月工程“绕、落、回”三步走战略第二步中的一次重要任务，嫦娥四号任务中包含“鹊桥”号中继星和月球探测器两次发射任务。“鹊桥”号中继星在 2018 年 5 月 21 日发射，甚长基线干涉 (very long baseline interferometry, VLBI) 观测网对其进行了为期3周的每日实时测轨和后期约每周两次的轨道维持观测工作。在嫦娥四号探测器实时任务期间，VLBI 观测网也需要对中继星进行观测，利用分时观测快速切换技

收稿日期： 2021-03-19； **修回日期：** 2021-04-27

资助项目： 国家自然科学基金 (11873077)

通讯作者： 王广利，wgl@shao.ac.cn

术提供测轨服务，最快能在 40 s 以内即可完成 4 个射电望远镜同步数据采集、实时数据传输和对 6 条基线的数据实时处理，获得高精度时延结果。

获取深空探测器的高精度位置和轨道是深空探测活动的关键。早期的深空探测任务主要使用无线电测距和测速的方法对探测器进行测定轨工作，通过测量信号在探测器和地面测站之间的传输时间得到距离；利用信号的多普勒频移获得探测器的速度。测速、测距得到的是探测器视线方向的速度和距离信息，当测站与观测目标间距离增加时，其在垂直视线方向上的精度缺陷，使其测量结果难以满足一些关键弧段的定轨需求，为此，美国深空网 (Deep Space Network, DSN) 于 20 世纪 70 年代开始引入 VLBI 技术[1–3]。

VLBI 技术是广泛应用在天体测量、天体物理等领域的测量技术，是目前分辨率最高的天文观测技术[4]。它利用 2 台以上相距很远的射电望远镜同时观测同一目标，接收其发射的电磁波信号，通过测量信号波前到达不同测站之间的时间差 (时延) 及其变化 (时延率)，可以提供观测目标在切向方向的位置与速度信息。由于其在垂直视线方向上的灵敏度优势，可与测速、测距数据互补得到更精确的航天器位置和轨道信息[5]，目前该技术被美欧、日本等国的航天机构作为主要测量手段之一应用于深空探测器的测定轨工作中。在 VLBI 测量过程中信号先后经过电离层、对流层，而后到达地面射电望远镜，经过天线聚集信号、接收机对信号放大、混频、滤波处理后被数据采集终端采样记录。由于电离层、对流层以及设备会影响时延测量结果，而且通常探测器发射的信号较弱、带宽较窄，为提高测量精度，常需要交替观测射电源和探测器，并使用射电源测量结果对探测器进行修正，这种方法称为差分 VLBI (delta very long baseline interferometry, ΔVLBI)。在深空探测中，天线接收的是探测器发射的 DOR 信号，因此，这一测量方式也被称为 ΔDOR 型 VLBI 技术[5, 6]，或双差单程测距 (delta differential one-way ranging, ΔDOR)。ΔDOR 相较于其他测量方式可以提供天平面内直接的几何测量，减少了每周跟踪观测的弧段数，同时 ΔDOR 无需发送上行信号。测速、测距对探测器视向方向变化敏感，而 VLBI 对垂直视线方向的变化敏感，两者互为补充，在一些关键阶段，如地月转移、近月制动阶段更能体现其优势[7]。

我国从嫦娥一号开始将 VLBI 技术应用于深空探测器的测定轨，在嫦娥一号和嫦娥二号中采用S波段遥测信号开展 VLBI 测轨工作，嫦娥二号任务中开展了 X 波段 ΔDOR 测量技术实验，采用事后处理模式进行了数据处理分析工作。嫦娥三号任务中首次实现了 ΔDOR 数据实时处理能力。嫦娥四号任务中，使用 S 波段 ΔDOR 技术对中继星开展了测定轨工作。在嫦娥一号任务中，采用首颗射电源修正方法，在嫦娥二号任务中采用了邻近射电源修正方法，即以 1 h 为轮换周期进行探测器、射电源的观测，其中射电源观测 15 min，探测器观测 45 min。在嫦娥三号任务中使用快速切换观测模式的邻近射电源修正方法，即射电源和探测器各 5 min 交替观测。在嫦娥四号探测器实时任务中，同样采用快速切换观测模式，完成了嫦娥四号探测器的测轨任务。本文对 ΔDOR 测量在探月工程中的应用做了介绍，同时为探究首颗射电源修正与邻近射电源修正方法之间的差异，分别采用两种时延修正方法对嫦娥四号实时任务期间的 ΔDOR 测量数据进行了处理，并对处理结果进行对比分析。

2 ddor 测量技术

2.1 ddor 测量原理

通常 ΔDOR 按照“射电源—探测器—射电源”的时序分别对射电源和探测器进行观测。图 1 展示了 ΔDOR 测量中探测器和射电源的相对位置关系，以及两者信号传播路径和 VLBI 系统内部的数据流。探测器与射电源信号到天线的传播过程中受到电离层、对流层的影响，会产生附加时延；另外，天线系统内部传输电缆的长度受温度等外界环境影响发生的变化以及时钟稳定性都会对时延产生影响。因此，探测器 (SC) 和射电源 (QSR) 的时延测量值可以分别表示为：

$$\tau_{\mathrm{QSR}} = \tau_g^{\mathrm{QSR}} + \Delta\tau_g^{\mathrm{QSR}} + \tau_{\mathrm{inst}}^{\mathrm{QSR}} + \tau_{\mathrm{clk}}^{\mathrm{QSR}} + \tau_{\mathrm{atm}}^{\mathrm{QSR}} + \tau_{\mathrm{ion}}^{\mathrm{QSR}} + \tau_{\varepsilon}^{\mathrm{QSR}} \quad , \tag{1}$$

$$\tau_{\mathrm{SC}} = \tau_g^{\mathrm{SC}} + \Delta\tau_g^{\mathrm{SC}} + \tau_{\mathrm{inst}}^{\mathrm{SC}} + \tau_{\mathrm{clk}}^{\mathrm{SC}} + \tau_{\mathrm{atm}}^{\mathrm{SC}} + \tau_{\mathrm{ion}}^{\mathrm{SC}} + \tau_{\varepsilon}^{\mathrm{SC}} \quad . \tag{2}$$

式中，$\Delta\tau_g$ 是几何时延的模型误差；τ_{inst}，τ_{clk}，τ_{atm}，τ_{ion} 分别为台站仪器时延、基线钟差、中性大气以及电离层时延；τ_{ε} 表示测量中的其他误差因素。其中几何时延 τ_g 是利用测量目标和测站坐标以及地球定向参数等先验资料进行计算所得，是时延观测量的主要部分[5]。

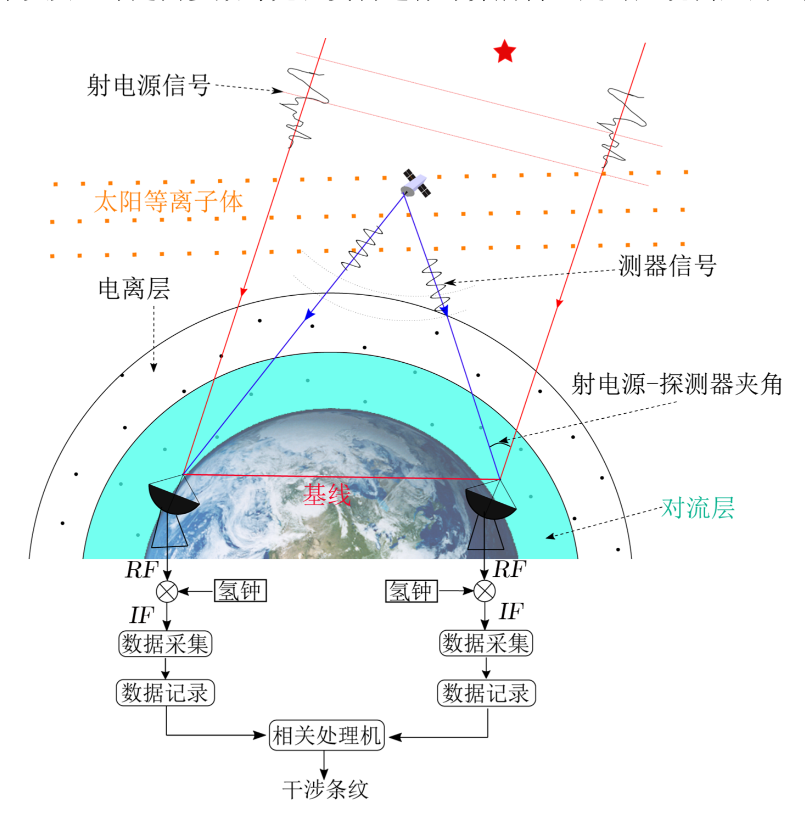


图 1 ΔDOR 探测器与射电源相对位置关系及信号传输路径

由于对射电源和探测器的观测是在相同频段，同样通道进行，而且河外射电源和探测器角距很近，通常角距在 10° 以内；对两者的交替观测在数分钟内完成，信号在传播路径上的误差具有很强的时空相关性，因此，将强河外射电源的残余时延与探测器的残余时延进行差分处理，可以消除如台站位置、传输介质和仪器等共同因素引起的测量误差[2, 8, 9]。这里的残余时延是相对于相关处理模型时延的观测改正值。将射电源的时延观测值 ($\tau_{\rm QSR}$) 内插或外推到探测器观测时刻，并与探测器观测值 ($\tau_{\rm SC}$) 做差：

$$\Delta\tau = \tau_{\rm SC} - \tau_{\rm QSR} = (\tau_g^{\rm SC} - \tau_g^{\rm QSR}) + (\Delta\tau_g^{\rm SC} - \Delta\tau_g^{\rm QSR}) + \varepsilon \quad , \tag{3}$$

式中的 $\Delta\tau_g^{\rm SC} - \Delta\tau_g^{\rm QSR}$ 项，是探测器时延模型误差与射电源时延模型误差的差值，由于作为参考源的河外射电源位置等信息是精确已知的，可认为 $\Delta\tau_g^{\rm QSR} = 0$；而探测器位置是未知的，其时延模型不够准确，$\Delta\tau_g^{\rm SC}$ 不为 0，是需要求解的量。为适应定轨、定位的需求，在嫦娥四号的测量任务中采用 $\tau_g^{\rm SC} + \Delta\tau_g^{\rm SC}$ 作为观测量输出，并用于探测器的测定轨处理[6]。ε 表示式 (1), (2) 中后四项差值，由于两者观测时间和位置并不严格一致，故依然存在一些未能消除的误差，该项也是 ΔDOR 测量的主要误差源。

2.2 射电源时延修正算法

如图 2 所示，X 波段 ΔDOR 包含五个信号，一个主载波和两对侧音。假定探测器多信号残余相位用 $\phi_k^{\rm SC}$ 表示，对应信号频点处的射电源残余相位为 $\phi_k^{\rm QSR}$，k 为 X 波段的五个 ΔDOR 信号。经射电源相位修正后的探测器相位为：

$$\phi'_k = \phi_k^{\rm SC} - \phi_k^{\rm QSR} \quad , \tag{4}$$

$\phi_k^{\rm QSR}$ 的计算公式为：

$$\phi_k^{\rm QSR} = \tau_{k_{if}}^{\rm sbd}(f_k - f_0) + \phi_0 \quad , \tag{5}$$

$\tau_{k_{if}}^{\rm sbd}$ 为探测器信号 k 所在的观测通道的射电源单通道时延，f_k 为探测器信号 k 的频率，f_0 为射电源参考频率，ϕ_0 为射电源参考频率处的相位。

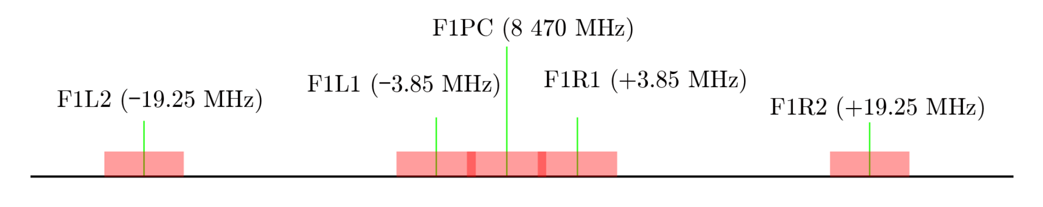


图 2　DOR 信号结构

对 ϕ'_k 进行多信号综合 (带宽综合) 得到射电源修正后的探测器时延 τ'。假定射电源残余相位未进行大气、电离层改正，探测器残余相位也未进行大气、电离层残余相位改正，则扣掉介质效应后的探测器时延为：

$$\tau'' = \tau' - (\tau_{\rm atm}^{\rm SC} - \tau_{\rm atm}^{\rm QSR}) - (\tau_{\rm ion}^{\rm SC} - \tau_{\rm ion}^{\rm QSR}) \quad , \tag{6}$$

τ'' 中还包括了从射电源观测时刻到探测器观测时刻期间由于基线钟速引起的时延改正。假定基线钟速用射电源测定，则：

$$\dot{\tau}_{\mathrm{clk}} = \dot{\tau}^{\mathrm{QSR}} - \dot{\tau}_{\mathrm{atm}}^{\mathrm{QSR}} + \dot{\tau}_{\mathrm{ion}}^{\mathrm{QSR}} \quad , \tag{7}$$

于是扣除钟速效应后的探测器时延为：

$$\tau = \tau'' - \dot{\tau}_{\mathrm{clk}} \Delta t \quad , \tag{8}$$

Δt 为射电源与探测器两次观测之间的时间差。

带宽综合时延是通道条纹相位随频率变化的斜率，各通道的条纹相位可以是 $n \times 360°$，其中 n 为任意整数，由此产生了模糊度问题。在进行带宽综合前使用参考通道射电源时延消除模糊度。以双通道为例进行分析，残余相位 ϕ_i 与残余时延 τ 有如下关系：

$$\phi_i = 2\pi f_i \tau - 2\pi N_i \quad , \tag{9}$$

式中，N_i 是相位模糊度，那么带宽综合时延为：

$$\tau = \frac{\phi_2 - \phi_1}{2\pi(f_2 - f_1)} + \frac{N_2 - N_1}{f_2 - f_1} \quad , \tag{10}$$

其中，$\dfrac{N_2 - N_1}{f_2 - f_1}$ 即为带宽综合的时延模糊度。为确定等模糊度，需要获得一个初始时延观测值 τ_0 作为参考，值可以由通道内具有一定带宽的信号，如主载波信号进行条纹拟合得到。由初始时延值再结合下式进行计算，可得到一个外推相位 ϕ_2'：

$$\phi_2' = \phi_1 + 2\pi \left(f_2 - f_1\right) \tau_0 \quad . \tag{11}$$

对外推相位与实际计算的相位做差、取整可以得到相对相位模糊度：

$$N_2 - N_1 = \left[\frac{\phi_2' - \phi_2}{2\pi}\right] \quad , \tag{12}$$

式中“[]”表示取整将式 (12) 代入式 (10) 便可得到双通道带宽综合时延。

对于图 2 所示 DOR 信号，首先使用主载波信号的时延作为参考时延，由第一侧音信号计算出三通道带宽综合时延，而后将该时延作为参考时延再进行计算可得到五通道带宽综合时延。

基于以上分析，多信号探测器时延计算流程如下：

(1) 根据式 (5) 计算计算各频点处的射电源残余相位，并用式 (4) 对探测器单信号作相位修正得到 ϕ_k'；

(2) 对主载波信号进行条纹拟合得到单通道时延，作为初始参考时延 τ_0；

(3) 根据式 (9)－(12) 进行带宽综合，计算得到探测器多信号综合时延 τ'；

(4) 对 τ' 进行介质修正和钟速修正，可得到探测器信号综合时延 τ：

$$\tau = \tau' - (\tau_{\mathrm{atm}}^{\mathrm{SC}} + \tau_{\mathrm{ion}}^{\mathrm{SC}}) + (\tau_{\mathrm{atm}}^{\mathrm{QSR}} + \tau_{\mathrm{ion}}^{\mathrm{QSR}}) - \dot{\tau}_{\mathrm{clk}} \Delta t \quad , \tag{13}$$

其中，$\dot{\tau}_{clk}$ 采用式 (7) 计算。

3 嫦娥四号中的 ΔDOR 测量

3.1 测量系统

嫦娥四号 VLBI 观测网 (见图 3) 由上海天马射电望远镜 (TM)、北京密云射电望远镜 (BJ)、乌鲁木齐南山射电望远镜 (UR)、昆明凤凰山射电望远镜 (KM) 以及上海天文台 VLBI 数据处理和指挥中心 (VLBI 中心) 组成。它们之间通过高速专用网络连接，组成具备实时数据传输和处理能力的深空测量网。各台站的观测数据通过网络传输到上海 VLBI 中心，经过相关处理、相关后处理，得到探测器的时延和时延率，随后利用 VLBI 测量数据以及测距、测速数据对探测器进行定位定轨。

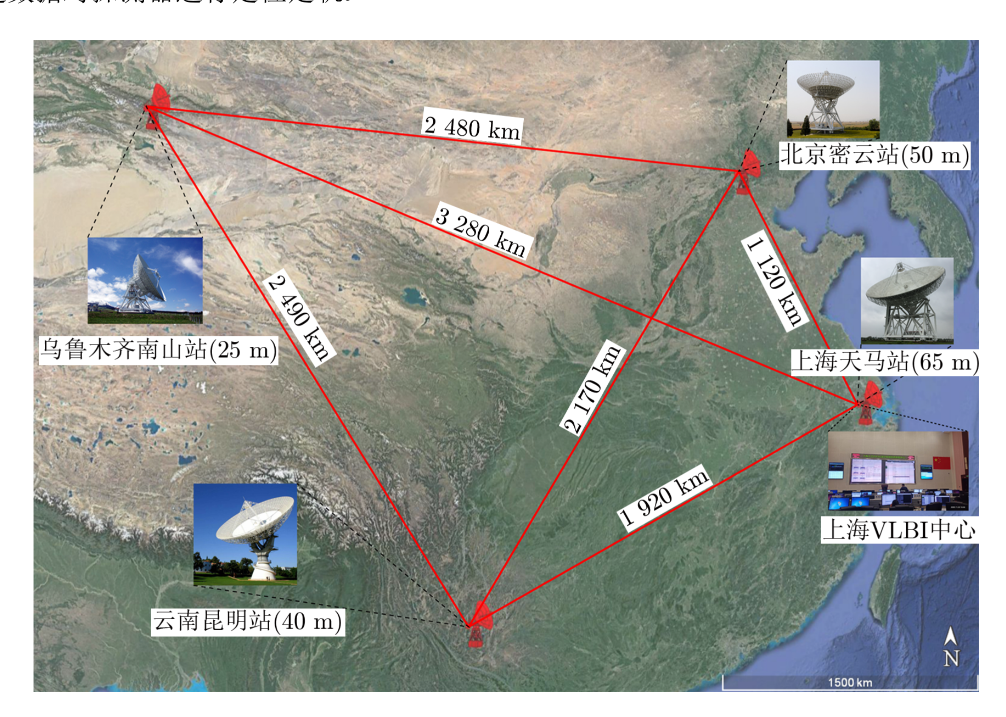


图 3　VLBI 观测网分布图

3.2 观测模式

从嫦娥四号探测器发射，到进行月球背面着陆前，VLBI 每日都会开展探测器的实时观测任务，其中有 15 d 开展中继星和探测器分时观测。在开始对探测器进行跟踪测量前会对强射电源进行 30 min 左右的观测，用于改正观测装置带来的误差和为探测器观测时的带宽综合提供各通道的修正相位；然后再进行探测器与其邻近的射电源之间各 5 min 的交替观测。如图 4 所示，ΔDOR 测量的完整周期按照“射电源—探测器—射电源”的观测顺序组成，其中对目标的一次连续观测称为 scan，一个测量周期中有 3 个 scan。探测器与射电源之间的角距一般在 2° ～ 15° 之间，在射电源流量满足测量精度要求的前提下，优先选取最靠近探测器的射电源进行观测；最后对强射电源再进行 30 min 左右的观测，用于事后处理

消除各个信号记录通道间的设备相位差异以获得更精确的观测结果。

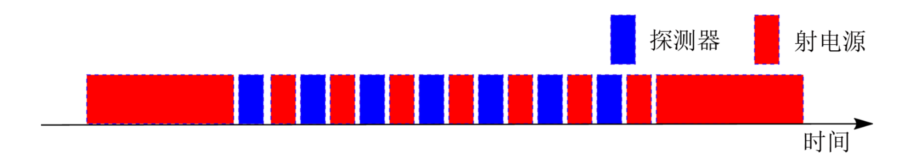


图 4　嫦娥四号中射电源与探测器的交替观测流程

3.3　数据处理

ΔDOR 测量系统的数据处理流程如 图 5 所示，各测站使用 8 通道、2 比特量化进行采样记录的射电源信号和探测器信号通过网络实时传输到 VLBI中 心进行处理。相关处理机对探测器和射电源信号进行处理得到各台站的自相关谱及它们之间的互相关谱，对探测器约每 5 s 一次结果、对射电源约 5 min 输出一次结果。之后经过相关后处理，得到探测器的时延、时延率数据，用于对探测器定位、定轨。

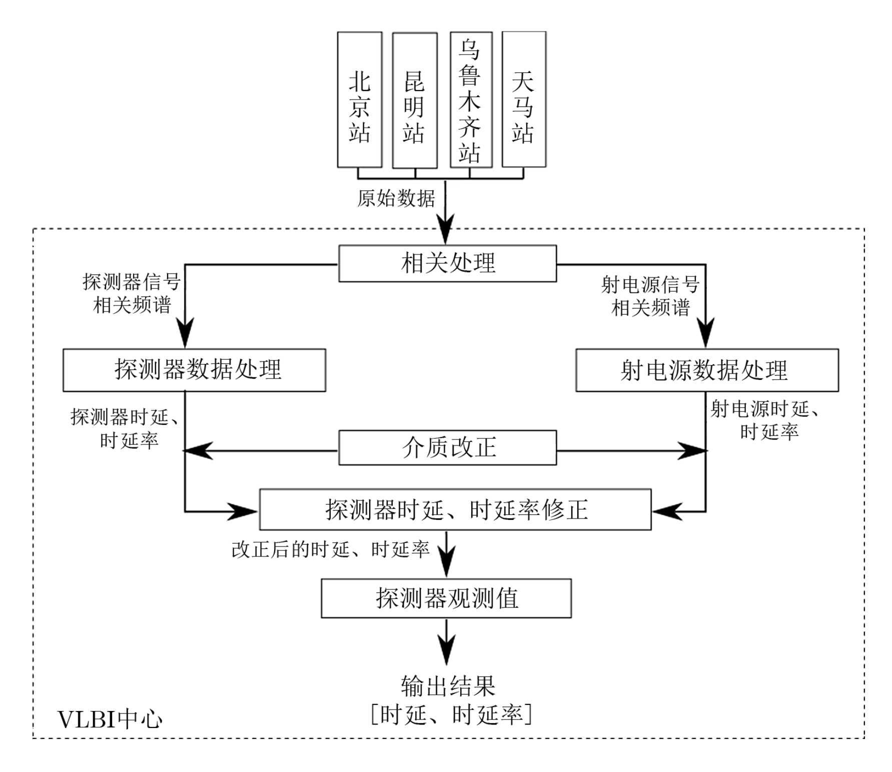


图 5　数据处理流程图

在相关后处理中分别采用 5 s 和 300 s 的积分周期对探测器和射电源互相关数据进行条纹拟合、带宽综合，获得各基线的探测器和射电源的粗残余时延、时延率。探测器处理，首先分别提取单通道 DOR 信号相位，并使用参考源来校准单通道相位，之后计算出带宽综合的时延、时延率；然后对粗时延、时延率进行介质改正，扣除介质对时延测量的影响，在事

后处理模式中使用水汽辐射计、GNSS 双频接收机、气象仪等大气参数测量设备实时测量的数据，计算出传播介质在视线方向上的时延来修正其引起的误差[10]；在实时模式中使用模型预报的介质时延来对粗时延改正。通过临近射电源观测，利用射电源时延修正探测器时延，进一步削弱了传播介质对时延测量的影响，以及台站钟差、设备时延对时延测量的影响。在实时数据处理模式中，使用在探测器之前观测的射电源结果外推到探测器观测时刻，对探测器时延进行修正；在事后数据处理模式中，将在探测器前后观测的射电源结果内插到与探测器观测时刻，来进行修正。最后将改正后的残余时延与模型时延相加得到探测器的时延观测值。

根据参考源的选择，有两种不同的时延修正方法：(1) 使用首颗长时间观测的射电源作为参考源；(2) 使用交替观测中相位、时延、时延率精度满足质量要求的最近射电源作为参考源。早期的任务中，对探测器的时延修正使用的是方法一，在嫦娥四号中采用方法二对探测器时延进行修正。下面根据嫦娥四号实时任务期间ΔDOR 测量资料，按照事后数据处理模式分别用两种不同的时延修正方法进行处理，对两者时延数据处理结果进行对比分析。

4　探测器 ΔDOR 测量结果分析

表 1 给出每次观测的任务代码和观测时长信息，第 3 列是观测探测器的 scan 数，每次持续 5 min，UR 站位于四个测站最西面，其入场观测探测器的时间较晚，三站可共视时便开始观测，故表中分别列出了三站和四站共视观测探测器的 scan 数。

表 1　CE4 探测器任务观测情况

观测代码	观测时长/h	探测器 scan	三站 scan	四站 scan
s8c08a	8	41	14	27
s8c09a	8.5	45	13	32
s8c10a	5	21	11	10
s8c14a	6.5	27	9	29
s8c15a	10	51	8	43
s8c16a	7.5	27	8	19
s8c19a	9	26	4	22
s8c20a	9	24	4	20
s8c21a	9	29	4	25
s8c22a	9	28	2	26
s8c24a	9	41	3	28
s8c25a	12	67	3	64
s8c26a	8.5	33	4	29

注：第 1 列观测代码由六位字符组成：“8”表示 2018 年，“c”表示 12 月，“08”表示 8 号；第 2 列观测总时长 (小时)；第 3 列是探测器观测 scan 数，一个 scan 时长 5 min；第 3, 4 列分别表示三站、四站共视观测探测器的 scan 数。

4.1 残余时延

群时延是 VLBI 的观测量之一，它们需要通过对获取的射电源或探测器信号进行相关处理得到；而残余时延是指相对于相关处理模型时延的观测改正值，即观测值与理论值之差。通过相关后处理解算出残余时延并对其进行改正，将改正后的残余时延加上模型时延后可得到VLBI 时延的解算结果并用于探测器的定轨定位。

以 2018 年 12 月 16 日的一次观测 (任务代码 s8c16a) 为例，此次观测持续 7.5 h，对探测器观测 27 个 scan。按事后处理模式，分别用两种时延修正方法对数据进行处理。图 6 为各基线两种修正方法得到的残余时延结果，红色标记为方法一，蓝色为方法二。由于在 9 时附近，KM 站设备出现波动致使 BJ-KM, KM-UR, KM-TM 这 3 条基线残余时延在之后的 scan (紫色方框内的 scan) 中出现约 10 ns 的跳变。在发生跳变之后的 scan 中，由于方法一使用此前的射电源作为校准源校准探测器相位，未能准确消除跳变，其结果始终含有该跳变；方法二使用跳变发生后观测的邻近射电源作为参考源，参考源的测量信息中同样包含该设备跳变影响，其差分结果中消除了这一跳变。

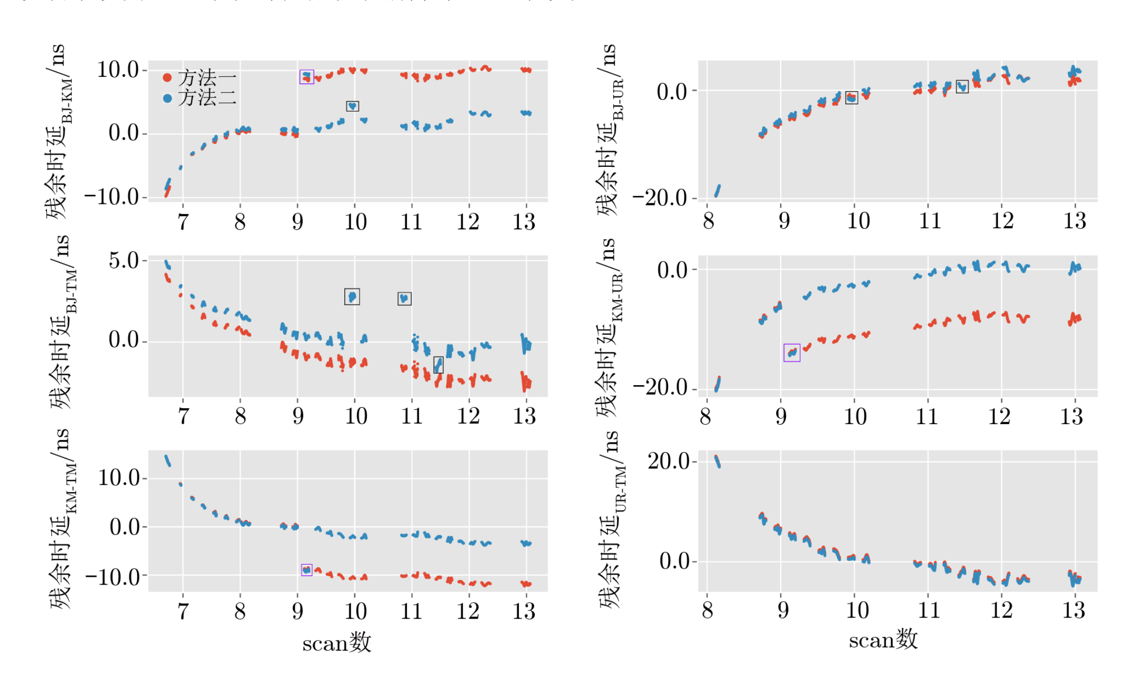


图 6 2018 年 12 月 16 日六基线残余时延

从 图 6 可知，两种方法的残余时延会随观测时间的增加逐渐产生差异，BJ-UR, BJ-TM, UR-TM 三条基线中这一现象更为明显，观测开始时两者残余时延值几乎相等，结束时出现约 2 ns 的差异 (BJ-TM 基线)。中性大气、电离层、EOP 误差、台站位置误差等对测量结果的影响都与探测器和射电源角距有关，方法一使用首个射电源作为参考源，角距逐渐增加；方法二使用邻近源，角距近似不变；所以两者残余时延也会随角距 (观测时间) 增加出现明显变化。另外可以看到，方法二的残余时延会在个别scan中出现偏离趋势的结果，而

观测当天探测器并没有变轨等动作，残余时延不会因为预报轨道出现突变，这些差异仅有 2 ~ 3 ns。

从图 7 可以看到，BJ 相关的基线中都有个别 scan (黑色方框中的 scan) 由方法二计算所得的时延测量误差存在异常。考虑到时延误差与探测器信号的相位误差和参考源的相位误差有关，而方法一中的误差没有出现异常，因此很可能是由于异常 scan 前后 BJ 站射电源信号信噪比下降。具体原因还需要深入分析，这里暂不做讨论。

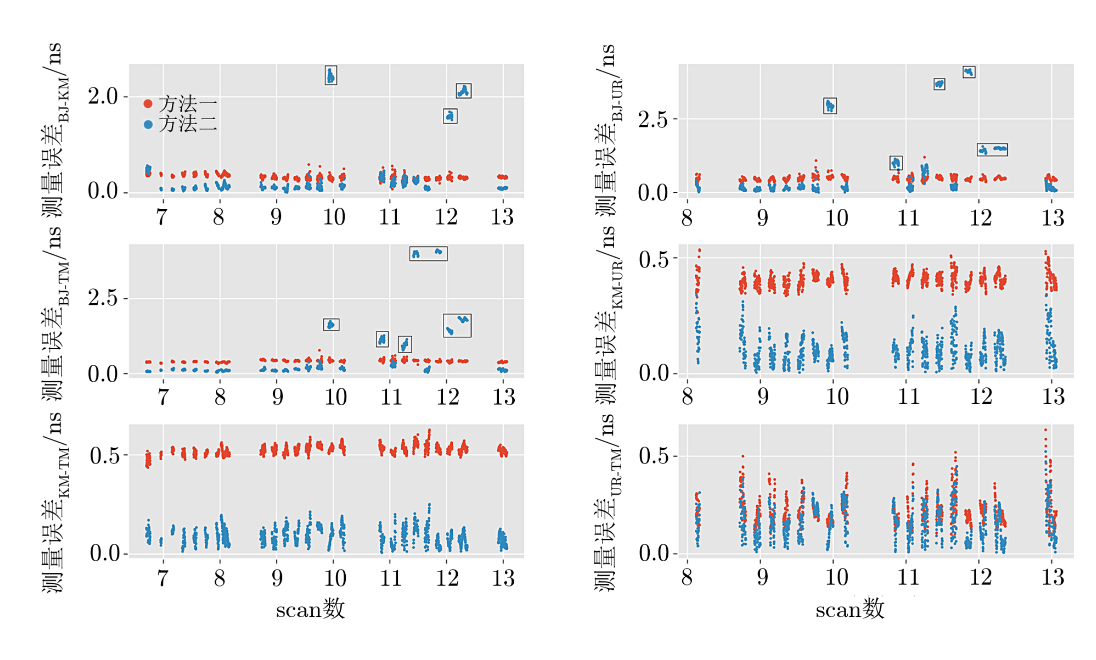


图 7　2018 年 12 月 16 日六基线测量误差

4.2　闭合时延

为了解时延测量结果的内符精度，我们对 ΔDOR 每天观测时延的闭合时延做了计算。此处采用的闭合时延的意义是以地心为参考的同一波前时延观测量，即各基线相对于地心时标的时延观测量之和 (如果不考虑射电源结构因素闭合时延的理论值为 0)。在分析闭合时延时，一般只需要计算 VLBI 网中任意 3 个测站组成的基线的闭合时延值即可[11−14]，当计算接近于 0 时便可以认为整个网的观测时延是闭合的，或者说其系统差很小。

图 8、图 9 分别给出了表 1 中各次任务分别使用两种时延修正方法处理所得 KM, UR, TM 三站基线残余时延闭合差的均方根和标准差。其中前者可以反映基线时延闭合差与0值的偏差程度，即该方法的系统差；后者可以反映基线时延闭合差的稳定程度，即该方法的稳定性。结合图 8 和图 9，两种方法的闭合差都在 0.5 ns 内，相较方法二而言，方法一的各次任务间的闭合差变化较大，但一次观测内各 scan 间闭合差变化相对稳定。这一定程度上反映了两种时延修正方法的特性：方法一使用固定的参考源，一次任务内系统差相对稳定；方法二使用邻近参考源，由于参考源在观测过程中会发生变化，其系统差也会相应发生变化。

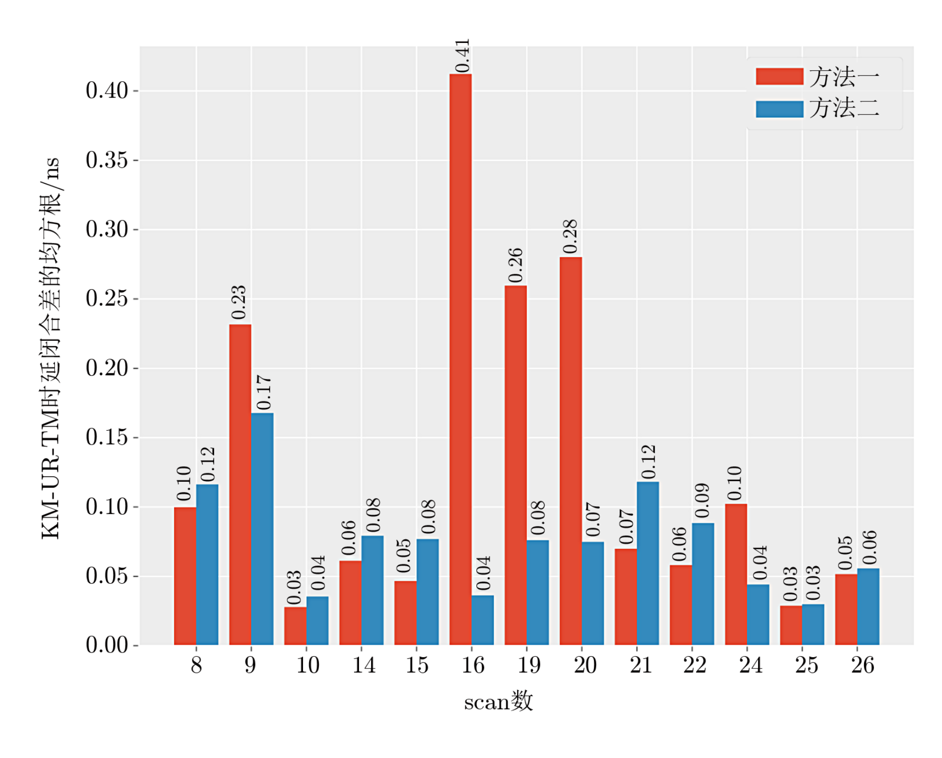


图 8 KM, UR, TM 三站基线时延闭合差的均方根

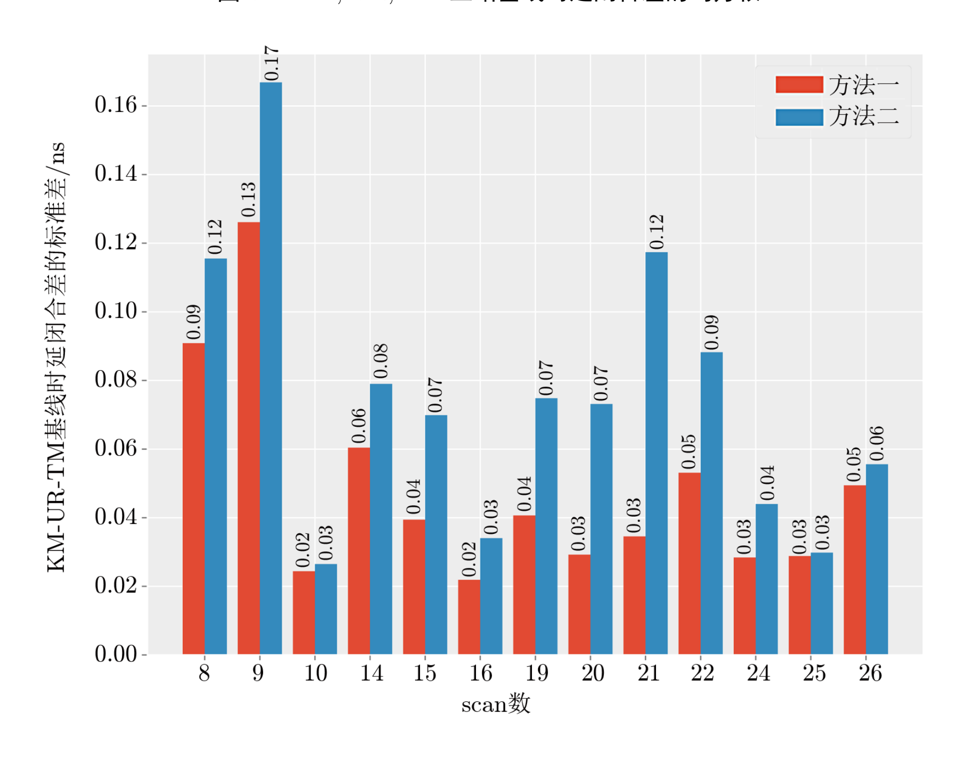


图 9 KM, UR, TM 三站基线时延闭合差的标准差

4.3　定轨后残差

为了对 VLBI 时延测量精度进行外部检核，利用两种时延修正方法处理所得的时延测量结果进行定轨，并计算出定轨后残差。图 10 展示了任务期间各次观测结果的定轨残差的 RMS，由于 16 号 KM 站的设备异常引起的跳变使得方法一的定轨残差明显变大，其余各次观测定轨残差均在 0.3 ns 以内，且两者差异并不特别明显。

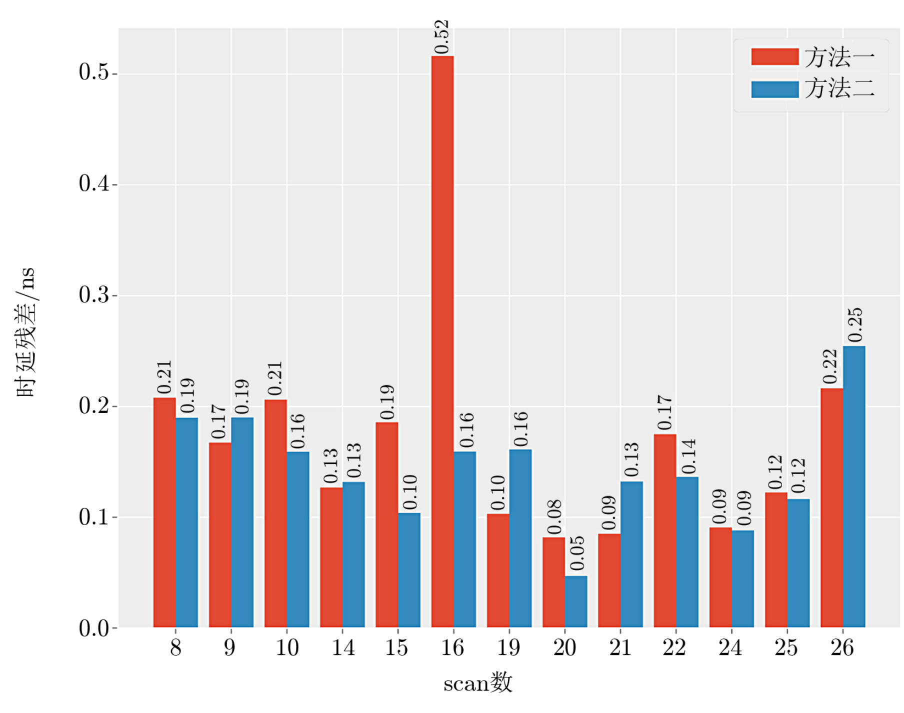


图 10　定轨后拟合时延残差

5　总　结

本文采用两种射电源标校方法对 CE4 号探测器实时任务期间 VLBI 实测数据进行了处理，通过对两种时延修正方法结果进行对比分析发现，两种时延修正方法得到的时延测量值较为接近，两者差异有随观测时间而增加的趋势，多数情况下在 1 ns 以内。对于方法一来说，由于其固定使用一个长时间观测的较强射电源作为参考源，在一次观测任务内，其测量误差相对稳定且精度一般较高。但是如果在观测期间出现了设备系统的跳变则会导致跳变后的结果无法准确修正，因此对设备系统的稳定性和可靠性有更高要求。对于方法二，使用邻近源作为参考源，由于其探测器的观测时间间隔、角距都相对较小，能够有效地修正介质影响以及设备波动带来的误差。但由于采用临近射电源，其信号强度随不同射电源有强弱变化，因此时延修正精度亦会发生变化，表现为在不同 scan 间有较大的波动，弥散度较大。从系统运行的稳定性、可靠性要求来说，是一种更有效的方法。无论是从三站基线闭合差，还是从定轨后时延残差来看，方法二测量结果都相对较好。

参考文献：

[1] Maddè R, Morley T, Abelló, R, et al. ESA bulletin, 2006, 128: 68
[2] Curkendall D W, Border J S. The Interplanetary Network Progress Report, 2013, 193: 42
[3] Book G. Delta-DOR Technical Characteristics and Performance, 2013: 1
[4] Richard T A, Moran J M, Swenson Jr G W, et al. Switzerland: Springer Nature, 2017: 23
[5] 钱志瀚, 李金岭. 北京: 中国科学技术出版社, 2013: 58
[6] 吴伟仁, 王广利, 节德刚, 等. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 185
[7] 刘庆会. 深空探测学报, 2018, 55(5): 435
[8] James N, Abello R, Lanucara M, et al. Acta Astronautica, 2009, 64: 1041
[9] Border J S, Koukos J A. Technical Characteristics and Accuracy Capabilities of Delta Differential One-Way Ranging (DeltaDOR) as a Spacecraft Navigation Tool, 1993:1
[10] 李金岭, 张津维, 刘鹂, 等. 航天器工程, 2012, 21: 62
[11] 陈明, 刘庆会. 天文学进展, 2010, 28: 415
[12] 郑鑫, 刘庆会, 吴亚军, 等. 天文研究与技术, 2016, 13(4): 400
[13] 唐歌实, 韩松涛, 曹建峰, 等. 力学学报, 2015, 47: 24
[14] 陈冠磊, 郑鑫, 陈明, 等. 天文学进展, 2012, 30: 518

Application of Two Time Delay Correction Methods in the ΔDOR Measurement of Chang'e 4 Probe

XIAO Wei[1,2], YANG Peng[1,2], ZHANG Zhi-bin[1,2], WANG Guang-li[1,2,3,4]

(1. Center for Astro-geodynamics Research, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 4. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China)

Abstract: ΔDOR is a differential VLBI technology applied in deep space exploration. Through differential processing of the measurement results of deep-space probe and radio source supply, the measurement errors caused by the media, station equipment and clock are weakened or eliminated. At present, there are two different delay correction methods in the post-correlation processing of ΔDOR measurement in China, which use the first radio source as the reference source and the adjacent radio source as the reference source. The VLBI data of Chang'e 4 real-time mission are used to analyze the two methods. The difference between the two results is less than 2 ns, and there is a time-varying trend; Through the analysis of baseline delay closure and orbit determination residual error, it is found that, compared with the first radio source correction method, the adjacent source correction has some advantages.

Key words: VLBI; ΔDOR; Chang'e 4; delay correction